

УДК 625.855:577.4

## УПЛОТНЕНИЕ ГАЛИТОВЫХ ОТХОДОВ ПРИ СКЛАДИРОВАНИИ В ТЕРРИКОНЫ КАК ФАКТОР УСТОЙЧИВОСТИ ОТВАЛОВ КАЛИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Докт. геол.-минерал. наук, проф. КОЛПАШНИКОВ Г. А.,  
инж. РОМАШКО Д. В.

Белорусский национальный технический университет

Исследование процессов консолидации, изменения и упрочнения структурных связей дисперсной фазы кека хвостов (твердых галитовых отходов) проводилось в натурных и лабораторных условиях [1–3].

Нижние слои терриконов, находящиеся под давлением веса лежащих выше слоев, претерпевают деформацию уплотнения и вместе со встречным процессом образования кристаллизационных связей существенно изменяют механические и фильтрационные свойства. Для изучения процессов уплотнения и деформационных свойств кека хвостов были проведены эксперименты в компрессионных приборах системы Гидропроекта. В опытах использовались стандартные кольца, применяемые при компрессионных испытаниях. Нагружение образцов проводилось по двум схемам.

По первой схеме ступени нагрузки в 0,05 МПа прикладывались по достижении стабилизации осадок. По второй схеме ступени нагрузки в 0,1 МПа прикладывались через 1 ч после начала опыта. Процесс сжатия образцов с начальной плотностью (коэффициентом пористости)  $\rho = 0,4$  начинается с первых же ступеней нагрузок ( $p = 0,025 \dots 0,05$  МПа). Особенности поведения исследуемых образцов на деформативность является их значительная уплотняемость во времени (рис. 1). Процесс фильтрационной консолидации в целом заканчивается в течение 40...50 ч, на протяжении которых происходит 80...90 % всех деформаций (рис. 2). Наблюдаемые в последующие

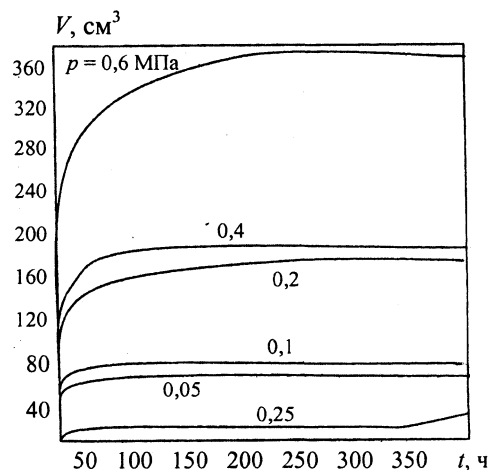


Рис. 1. График кинетики сжатия первичной рапы под действием приложенного давления

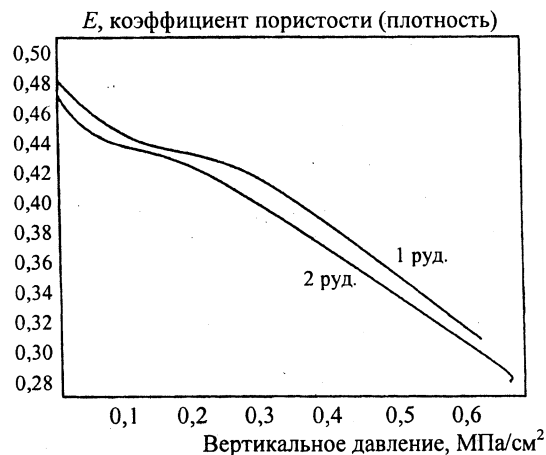


Рис. 2. Кривые зависимости изменения коэффициента пористости от приложенного давления кека хвостов 1-го и 2-го рудников

10...15 сут. осадки кека хвостов не превышают 15...25 % общей суммы деформации и связаны с процессами вторичной консолидации, т. е. сжатием скелета исследуемых образцов. Модуль деформации, подсчитанный по проведенным испытаниям для интервала нагрузок 0,1...0,2 МПа, составляет  $E_0 = 1,5...5,0$  МПа. Исследуемые образцы относятся к сильно сжимаемым грунтам. Модули осадок, рассчитанные по конечным значениям коэффициентов пористости, составляют  $I_0 = 100...150$  мм/м.

Таким образом, осадки отсыпаемых терриконов высотой 25...30 м за счет самоуплотнения под действием собственного веса могут достигать 1,5...2 м и более.

Для изучения деформируемости кека хвостов и условий быстрорастущих и значительных нагрузок была проведена серия опытов в реконструированном для этих целей приборе ИПП-10. Образцы кека хвостов, помещенные в кольца диаметром 40 см и высотой 3,5 см, загружались прессом ИПП-10. Значения величин приложения нагрузок изменялись в диапазоне 0,5...1,0 МПа. Деформации образцов регистрировались с помощью каротажного регистратора Н-361. В процессе опытов производились наблюдения за кинетикой релаксации порового давления. Весьма характерной особенностью проведенных экспериментов является то, что в исследуемых образцах кека хвостов с начальной влажностью 8...12 % коэффициент начального порового давления  $A = p_w/p_{ск}$  (отношение величины порового давления к давлению, воспринимаемому скелетом) равен или близок к единице. Для последующих ступеней нагрузок доля порового давления снижается, но остается весьма высокой:  $A < 0,6...0,7$ . Установленные высокие значения коэффициентов порового давления и характер его кривой релаксации во времени объясняются значительной вязкостью порового раствора исследуемых образцов – рассолов высокой концентрации ( $M = 375$  г/л).

Подсчитанные по проведенным экспериментам значения модуля осадок  $I_0 = 100...150$  мм/м близки к данным компрессионных испытаний, несмотря на значительную разницу прикладываемых давлений. Этот факт объясняется неполной стабилизацией осадок в опытах с ИПП-10 и высокими значениями порового дав-

ления, развиваемыми при быстро прикладываемых нагрузках.

Проведенные испытания фильтрационных свойств уплотненных подобным образом кека хвостов (конечное значение объемного веса  $1,8...1,95$  т/м<sup>3</sup>) показали их полную рассолонепроницаемость ( $K_f = 0$ ) и лишь в отдельных случаях – слабую проницаемость ( $K_f = 0,5...1,5 \cdot 10^{-3}$  м/сут.). Значения коэффициента фильтрации, подсчитанные по данным компрессионных испытаний, снижаются при возрастании уплотняющих нагрузок и продолжительности их воздействия в десятки и сотни раз. Так, если при первых ступенях нагрузок ( $p = 0,05...0,1$  МПа) коэффициенты фильтрации составляют  $K_f = 0,5...15$  м/сут., то в интервале давлений 0,4...0,6 МПа коэффициенты фильтрации  $K_f = 0,01...0,001$  м/сут. Отметим, что подобные косвенные определения (по данным компрессионных испытаний) недостаточно точны, поскольку значительную долю в общей сумме деформаций занимают процессы, связанные с вторичной консолидацией.

Прочностные свойства кека хвостов являются функцией плотности сложения, влажности, степени цементированности и характера структурных связей. Так, если для рыхлых свежееукладываемых кек хвостов значения углов внутреннего трения  $\phi$  и сцепления  $C$  близки к значениям для средне- и крупнозернистых песков (т. е.  $\phi = 30...40^\circ$ ;  $C = 0...0,01$  МПа), то прочностные свойства сильно уплотненных и хорошо цементированных разностей близки к значениям полускальных, а по ряду показателей (твердость, прочность на сдвиг и т. д.) – даже к скальным породам. Проведенные испытания для отдельных сильно уплотненных и дегидратированных образцов ( $\gamma = 1,86$  т/м<sup>3</sup>,  $W = 2,7$  %) показали высокую прочность на сжатие (временное сопротивление сжатию)  $R = 4,5$  МПа при сопротивлении сдвигу 2 МПа. В испытаниях на одноосное сжатие характер разрушений имеет бочкообразный тип с отслаиванием внешних поверхностей от плотного ядра образца.

Испытаниями коническим пластометром образцов кека хвостов установлено, что значение пластической прочности  $p_t$  колеблется в широком диапазоне в зависимости от плотности и влажности этих образцов. Значения влаж-

ности находятся в пределах  $W = 4...9\%$ . Характерной особенностью деформационного поведения исследуемых образцов является высокая «чувствительность» к нарушению структуры. Значения пластической прочности для сцементированных образцов падают в десятки и сотни раз при нарушении структуры механическим путем  $K_{\text{чув}} = p_{\text{т(ненаруш)}}/p_{\text{т(наруш)}} = 10...100$ . Поскольку кристаллизационные структурные связи в сцементированных разностях кека хвостов образованы легкорастворимыми солями, чувствительность к агрессивному воздействию пресных и слабоминерализованных вод также чрезвычайно велика, особенно для недоуплотненных разностей, залегающих в верхних слоях терриконов. С этой способностью к значительному падению прочности структурных связей при растворении связаны быстроразвивающиеся карстовые и водно-эрозионные процессы.

Формирование искусственных пород с цементационными связями в теле солеотвалов происходит следующим образом.

Процессы консолидации кека хвостов и превращения их в твердые сцементированные породы аналогичны литификации глинистых осадков и могут происходить в несколько фаз, постоянно переходя одна в другую.

На первой стадии сжатия под собственным весом свежееуложенные отходы переходят в уплотненное состояние вследствие фильтрационной консолидации за счет значительной дегидратации (рис. 3). На второй стадии развиваются процессы вторичной консолидации, ведущие к появлению цементационных структурных связей. На третьей стадии затрудненного уплотнения преобладающими являются физико-химические процессы в порах, следствием которых становится образование закрытой пористости и кристаллизационных структурных связей. Продолжительность трех стадий оценивалась по данным определений водно-физических и механических свойств кека хвостов, отобранных в штольне солеотвала 1-го рудника и пройденных в терриконе через год после его отсыпки (рис. 4).

В результате процесса литификации согласно указанным стадиям в теле солеотвала формируются три характерные зоны, имеющие следующие инженерно-геологические свойства:

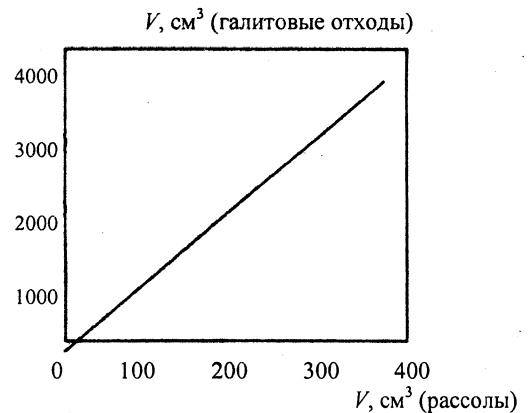


Рис. 3. График зависимости количества выделяющегося рассола от объема исследуемых галитовых отходов

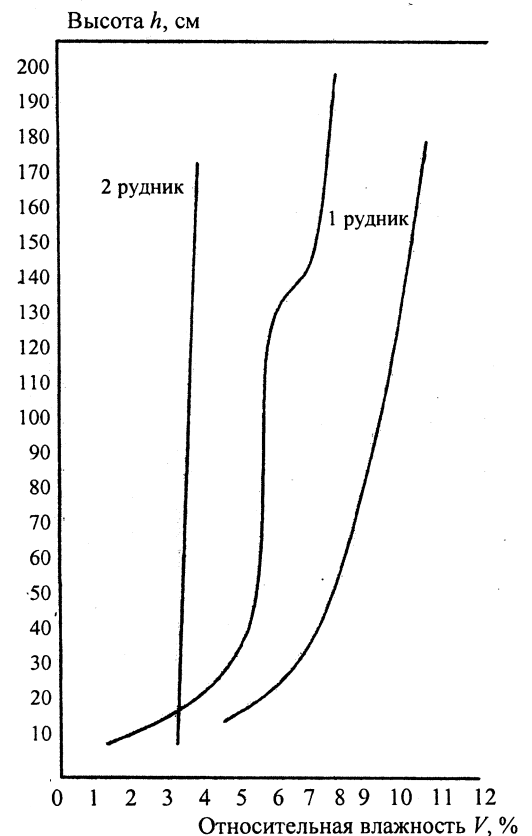


Рис. 4. Кривые распределения влажности в основании тела солеотвалов (образцы отобраны в штольнях 1-го и 2-го рудников)

а) зона сильноуплотненных кек хвостов (практически монолитных):

$$\gamma = 1,85...2,0 \text{ т/м}^3, \quad W_0 = 3...5\%, \quad K_{\phi} = 0;$$

б) зона среднеуплотненных кек хвостов:

$$\gamma = 1,765...1,85 \text{ т/м}^3, \quad W_0 = 5...10\%, \quad K_{\phi} = 0,5...0,005 \text{ см/сут.};$$

в) зона рыхлосложенных и слабоуплотненных кек хвостов:

$\gamma = 1,6 \text{ т/м}^3$ ,  $W_0 = 10,0 \dots 15 \%$ ,  $K_f$  – от 5 см/сут. до десятков м/сут.

Полученный нами экспериментальный материал и теоретические соображения [1–6] позволяют установить, что искусственная порода с цементационными связями в теле солеотвалов формируется в результате:

- дегидратации солевых отходов под действием сил гравитации;
- фильтрационной консолидации от веса вышележащих слоев;
- развивающихся во времени процессов пластической деформации;
- физико-химических процессов, протекающих в поровом растворе (концентрирование растворов и переход из жидкой фазы в твердую, рост кристаллогидратов в результате изменения плотности растворов, частичный переход рыхлосвязанной воды в химически прочно связанную и т. д.;
- гидродинамического эффекта при перепадах напоров.

Роль рапы внутри межкристалльного пространства в пластических деформациях кристаллов галитовых солей подчеркивается в [6]. Способность к пластическим деформациям солевых отходов, по-видимому, связана с высокой плотностью и монолитностью пород в теле солеотвалов. Время их формирования зависит от водно-физических свойств кек хвостов, высоты терриконов, условий оттока первичной рапы, фильтрационных свойств грунтов, подстилающих ложе солеотвала.

Проведенными лабораторными испытаниями (опыты с ИГП-10) установлено, что образование цементированных связей в образцах достигается через 1,5...2 сут., когда завершаются указанные процессы и возникает прочный структурный каркас, обеспечивающий цементацию («схватывание»), отдельных солевых частиц и заключенных в порах высокоминерализованных рассолов. Образование закрытой пористости обеспечивает практическую рассолопроницаемость исследуемых образцов. Время образования рассолопроницаемой зоны толщ в естественных условиях внутри солеотвалов, по-видимому, сможет произойти в течение более продолжительного времени (фото 1, 2).

Испытания фильтрационных свойств кек хвостов в основании штолен солеотвалов 1-го и 2-го рудников подтверждают наличие рассолопроницаемых зон. Данные водно-физических свойств твердосолевых отходов толщи и подстилающих солеотвал грунтов естественного основания (на глубине до 1 м), отобранных в штольне, показывают, что из рассматриваемых разностей пород наибольшей плотностью и наименьшей фильтрационной способностью обладают кек хвосты подошвы солеотвалов ( $K_f = 0$ ).

Наблюдения за режимом и динамикой влаги и солей в грунтах ложа «старых» солеотвалов также подтвердили факт формирования рассолопроницаемой зоны в их теле и отсутствия миграции рассолов через основание.

Исследования природы формирования прочных цементационных связей в кек хвостов показали, что их образование обусловлено законами молекулярной физики [5, 6]. Свойства твердого тела зависят от анизотропии – неодинаковости свойств кристаллов по разным направлениям. Силы притяжения и отталкивания соответственно зависят от расстояния между атомами. С уменьшением межатомного расстояния увеличивается потенциальная энергия частицы вещества.

Важную роль в процессах кристаллизации играют дислокации в атомных решетках (дефекты кристаллической решетки), которые приводят к их уменьшению. Образование дислокаций и температура определяют процесс роста кристаллов. Число дислокаций в кристаллах велико, достигает даже в естественных кристаллах значения  $10^8$  на  $1 \text{ см}^3$ , что способствует образованию благоприятных условий для их роста.

В твердых телах выделяют упругие и пластические деформации, причем пластические приводят к повышению предела упругости породы, т. е. к ее упрочнению. При пластической деформации происходит скольжение одних слоев кристаллов относительно других.

В соответствии с законами молекулярной физики переход сыпучей массы кек хвостов в твердую цементированную породу – это есть переход из состояния, лишенного симметрии, в то, при котором симметрия существует. Поэтому переход в твердое состояние происходит

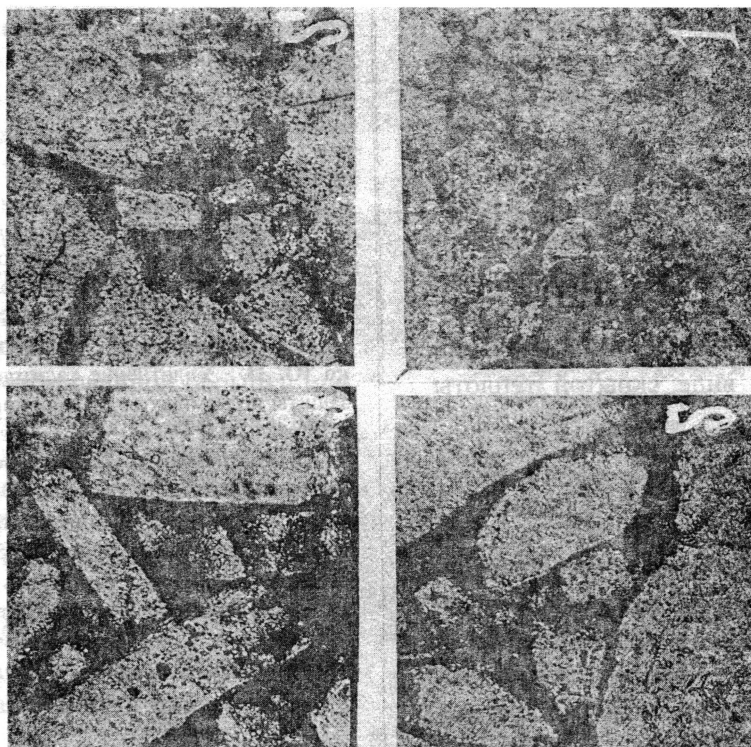


Фото 1. Кек хвосты слабой степени уплотнения при объемном весе  $1,20 \dots 1,40 \text{ г/см}^3$  (увеличено  $\times 50$ )

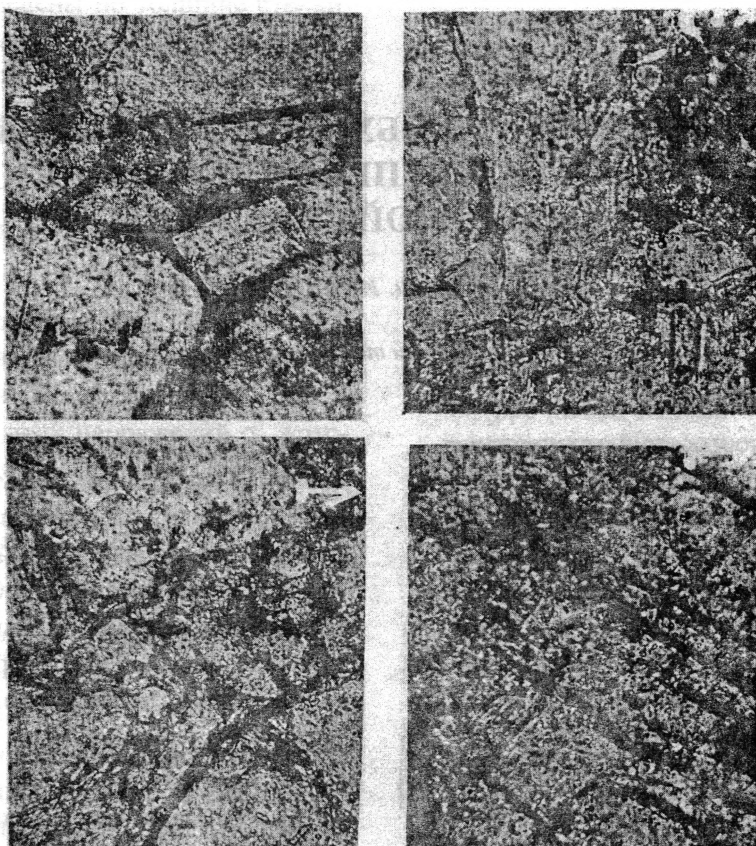


Фото 2. Кек хвосты сильной степени уплотнения при объемном весе  $1,85 \dots 2,00 \text{ г/см}^3$  (увеличено  $\times 50$ )

скачком, т. е. при определенной температуре. Этому явлению предшествует процесс уплотнения кристаллов и уменьшения межкристалльных расстояний.

Образование твердой кристаллической породы из кека хвостов при охлаждении жидкости происходит за счет кристаллизации при определенной температуре – температуре кристаллизации. В момент кристаллизации вследствие уменьшения энергии тепловых движений выделяется энергия в виде скрытой теплоты кристаллизации.

### ВЫВОД

Экспериментально доказано, что складываемые в терриконы отходы калийного производства (кек хвостов) по истечении времени приобретают высокие прочностные и противофильтрационные свойства, исключающие ми-

грацию рассолов в подземные воды и обеспечивающие устойчивость отвалов калийного производства.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Колпашников Г. А. Процессы засоления пород и подземных вод твердыми отходами калийных производств Солигорских калийных комбинатов // Доклады АН БССР. – 1970. – № 5, т. 14. – С. 443–445.
2. Колпашников Г. А., Клементьева В. П., Еременко Ю. П. Уплотнение галитовых отходов как фактор защиты подземных вод от проникновения в них рассолов // Доклады АН БССР. – 1973. – № 3, т. VII.
3. Колпашников Г. А., Еременко Ю. П. Влияние поровых растворов на изменение физико-механических свойств галитовых отходов калийной промышленности. – Киев: Наукова думка, 1974. – С. 95–99.
4. Кикоин И. К., Кикоин А. К. Молекулярная физика. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963.
5. Кулле П. А. Разработка месторождений соли подземным выщелачиванием // Труды ВНИИТА. – 1949. – Вып. 20.

УДК 628.112

## ОСНОВЫ РАСЧЕТА НЕОБХОДИМОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ДЕКОЛЬМАТАЦИИ ПРИФИЛЬТРОВОЙ ЗОНЫ ВОДОЗАБОРНОЙ СКВАЖИНЫ

Канд. техн. наук, доц. ИВАШЕЧКИН В. В.

Белорусский национальный технический университет

Для правильного построения технологического процесса импульсной регенерации фильтров водозаборных скважин [1] следует учитывать ремонтпригодность их фильтров, т. е. назначать такую величину давления в импульсе, которой будет достаточно для разрушения колюматирующих отложений на данном интервале обработки с сохранением прочностных качеств самого фильтра.

Исследованиями [2] установлено, что радиус зон, в которых сказываются колюматационные процессы, не превышает 0,5 м, при этом интенсивность процессов колюматации

существенно уменьшается с увеличением расстояния от стенки фильтра. Максимальной прочностью и наилучшими фильтрационными свойствами обладает слой сцементированной колюматантом гравийной обсыпки, непосредственно прилегающий к фильтру. Эта зона представляет собой песчано-гравийную фракцию, скрепленную новообразованным цементом, при этом ее прочность на осевое сжатие  $\bar{R}_{с.г}$  может изменяться от 0,3 до 2 МПа.

Сказанное выше позволяет схематизировать задачу колюматации и регенерации скважин как рассмотрение некоторой кольцевой зоны